

半導体レーザを用いた音波検出に関する研究

Study on detection of sound wave using a semiconductor laser

田中 聡充[†] , 津田 紀生^{††} , 山田 諄^{††}

Akimitsu Tanaka , Norio Tsuda , Jun Yamada

Abstract There are various sound wave detection methods. In this work, the sound wave detection using a semiconductor laser has been studied. In comparison with conventional microphone, this device can detect wide frequency and is strong in high sound pressure. The prototype device was able to detect a sound in frequency of 300Hz-40kHz. We can hear directly the human voice by joint the output of the device with a speaker. However, there is a variation of measured value, and is a weakness for vibration. This can be improved by arranging the measurement environment. Furthermore, the output voltage of the device has a maximum at 10cm. In addition, the angle of the speaker is sensitive at the right angle on the laser beam.

1. はじめに

現在、音波検出を行っているマイクロホンには様々な種類があり、それぞれメリット、デメリットを持っており、用途によって使い分けられていた。マイクロホンは大きく分けて「コンデンサマイク」と「ダイナミックマイク」の2種類がある。

コンデンサ型のマイクには2枚の電極板が用いられ片方を振動膜とし、音波により振動膜が振動することで音波を検出を行っている。コンデンサマイクは構造が簡単で小型で安価、平坦な周波数特性を持つ。しかしこの検出方法では振動膜が振動しない低周波や高周波では検出することができず、検出部に電圧が付加されているため高磁界や高電界中では電磁気的影響を受け、音波を検出することが困難である。また、振動膜自体が破れてしまうため衝撃波にも弱く、高音圧では使用することができない。そして音場の特性を測定する際にマイクロホンそのものを設置しなければならないため、音場を乱してしまう正確な音場分布の測定が行えなかった。

ダイナミック型のマイクでは振動膜に加えコイル、永

久磁石が使用されている。音波によって振動膜とコイルが振動し、電気が起こり、音による電気信号を得ている。指向性を持ち、電源も不要で振動にも強い。しかし、検出可能範囲がコンデンサマイクに比べ狭く、特に高音に弱い。どちらも検出可能な周波数域が制限され、音場を乱してしまう欠点がある。また、最近では不可聴域の音による人体への影響も問題視されており、可聴周波数域以外の音の検出も必要になると考えられる。

現在、振動膜を使用しない音波検出方法の1つとしてレーザ光の回折を用いた方法がある¹⁾。この方法では振動膜による欠点であった、周波数制限、電磁気的影響、高音圧、音場などの問題を改善することができる。しかし、音波による光の回折効率 $は 10^{-4}$ と感度が悪く、検出のためにはフーリエ変換光学系が必要となり、装置単価が高い。

そこで、半導体レーザ（以下、LD）の自己結合効果を利用した音波検出方法について研究を行った。現在、自己結合効果を利用した振動計²⁾、距離計³⁾などの研究が行われている。自己結合効果とは、従来、レーザ光が半導体レーザに戻ってきたときに戻り光ノイズとして扱われ、極力現れないようにしていた現象を指し、この現象を積極的に利用することで音波検出を行った。これによりセンサ部が半導体レーザと光を反射させる反射板のみとなり、回路も簡単な定電流回路とI/V変換回路で構成できることから装置・構成共に非常に簡略化することが

[†] 愛知工業大学大学院 工学研究科
電気電子工学専攻 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学 工学部 電気学科
電子工学専攻 (豊田市)

できる。本研究では簡単な音波検出装置を試作し、基本的な受音特性の測定を行った。

2. 測定原理

2-1. 自己結合効果

単一波長動作をする LD は、コヒーレント度が高いため、可干渉性が非常に強いという特徴を持っている。そのため、レーザ光が対象物に当たって外部反射板から反射光が LD の活性物質内に戻ってくると、出力光と干渉し合い出力光強度が変動する。この戻り光によって生じる光強度変動を戻り光ノイズと呼ぶ。戻り光ノイズによる LD の特性変化は出力光に対する相対的な光量が 10^{-6} 程度と極めてわずかであっても顕著に現れる。これは出力光と戻り光との干渉が共振条件を満たすと、LD の共振器内での増幅作用により、実際の戻り光量以上の出力の増加となるためである。この現象はこれまで各種の応用技術で雑音の原因として大きな障害となっていた。しかし、この現象を自己結合効果として利用し音波検出に応用した。そしてこの効果を用いることにより、センサ部が LD とレンズのみの構造となり小型化が可能で、また、わずかな戻り光でも顕著に効果が現れるため、小さい音であっても音波の検出が可能である。

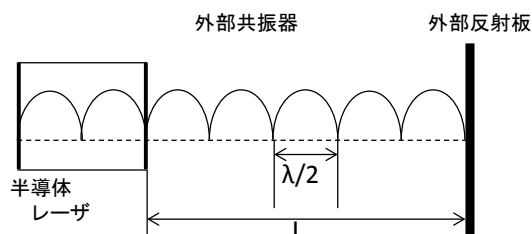


図1 複合共振モデル

本研究の測定原理である自己結合効果とは図1に示すように、LD から発振されたレーザ光は平行ビームにして外部反射板に照射する。その戻り光を LD 内部の活性領域内に戻す。この時、LD からの出力光と戻り光が LD 共振器内で干渉し、出力光が僅かに増減する。この現象を自己結合効果と呼ぶ。そして発振波長を λ 、LD から外部反射板までの距離を L とすると共振条件

$$L = \frac{\lambda}{2} \cdot n \quad (n ; \text{整数}) \quad (2.1)$$

を満たすとき両者の光は強め合い、光出力が最も増加する。本研究では外部反射板までの距離を一定に保ち、その間に音波を当て、音波によって起こる屈折率変化で波長や位相の変化による自己結合効果の光出力の増減をみることで音波検出に応用した。

2-2. 検出原理

本研究では LD から出た光をレンズによって平行ビームにし、レンズと外部共振器の間に音波をあて、音波による空気の密度変化による屈折率の変化を検出することでレーザ光から音波を検出することに応用した。音というのは疎密波であり、空気密度の高低で構成されている。音によって光路中の空気密度（＝屈折率）が変化し、戻り光量が増加することから音波検出に応用している。ここで光の関係式、および屈折率による波長変化を下に示す。

$$n = \frac{c}{v}, \quad v = f\lambda, \quad \lambda = \frac{1}{f} \frac{c}{n} \quad (2.2)$$

ここで n は屈折率、 c は光の速さ、 v は音の速さ、 f は音の周波数である。式 (2.2) からわかるように屈折率と波長は反比例の関係にあり、屈折率が高くなれば波長が短くなり波数が増加し、波長が長くなれば波数は減少し波数が多くなる。その関係を図2に示す。

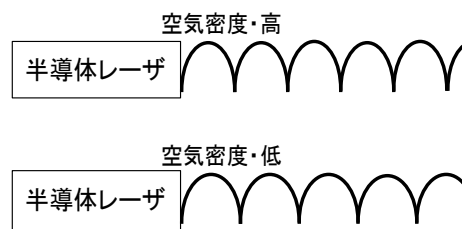


図2 音による波長変化

波長の変化から自己結合効果による光出力の増減が起き、その変化を見ることで音波検出に応用した。そして、1[Hz]以下の極低周波数から、数百[MHz]の高周波まで一つのレーザマイクロホンで検出を行うことが可能で、音場と非接触で検出しているために音場を乱すことなく音波検出を行うことが出来る。さらに、気体中以外に液体中、透明な固体中の粗密波を検出することが可能で、粗密波から検出を行っているため火災報知機や水中音波検出、プラズマ密度計測など、様々な応用にも広がる。

3. 測定装置

3-1. 測定装置概要

測定装置を図3に示す。本研究において試作した装置は、光学系と投光回路、受光回路から構成されている。

光学系は LD と集光レンズから成り、固定と集光距離調節のために真鍮製のシリンダで構成され一体型となっている。

投光部は LD 駆動回路のみで構成され、LD は LD 駆動回路によって無変調で発振し、レーザ光は集光レンズに

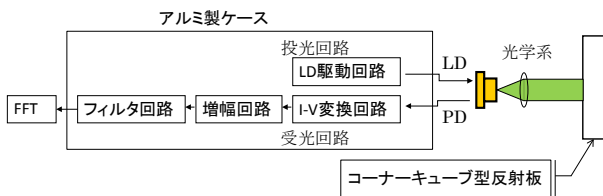


図3 測定装置

より平行ビームにされ反射板に照射される。反射板にはプラスチック製コーナーキューブ型の市販ものを使用した。レーザ光は反射板にて反射し、その戻り光は同じレンズで集光されLDの活性領域内に戻る。この戻り光によって得られた自己結合信号をLD内蔵のフォトダイオード（以下、PD）によって音波を直接検出する。

受光部はIV変換回路、増幅回路、フィルタ回路からなる。LD内蔵のPDの自己結合信号によって得られる信号電流は数 μA と非常に小さく、オペアンプを使用したIV変換回路を作製した。電圧信号に変換された受信信号はトランジスタとオペアンプを使用して最大で20倍まで増幅している。さらに得られた受信信号は周囲の雑音や、装置の振動なども検出してしまい、ノイズの多い信号となっている。今回はハイパスフィルタ、ローパスフィルタ、共にフィルタICを使用し、それぞれカットオフ周波数を70[Hz]、80[kHz]に設定した。そして測定には外部雑音の影響を避ける為にオシロスコープのFFTを使用し、スピーカからの音の周波数成分の測定を行った。反射板にコーナーキューブ型のものを使用することによって光軸調整を容易にすると共に、戻り光量を多くして自己結合効果をより強くしている。

投光部、受光部はアルミのケースに入れ、反射板は強い磁石を持つマグネットベースに接着剤で接着し、光学ステージに磁石で固定した。そして、LDと反射板の距離を15[cm]とし、レーザ光に対して垂直にスピーカより音波を当て、測定を行った。また測定の際に周囲の雑音の影響を避けるために遮音室内で測定を行った。

3-2. 光学系

本研究で作製した装置は小型で、構造も簡単であるのが特徴である。光学系ではPD内蔵のLDと集光レンズで構成され、真鍮製のシリンダと一体型となり、その概略図を図4で示す。

本研究では測定にLDの自己結合効果を使用するため、レンズは出力光と戻り光で同じ単眼式レンズを使用した。そのためレンズには光洋製の直径10[mm]、焦点距離10[mm]の両凸レンズを使用した。シリンダはLD側、レンズ側でそれぞれ分かれておりレンズ側はネジ式で稼働

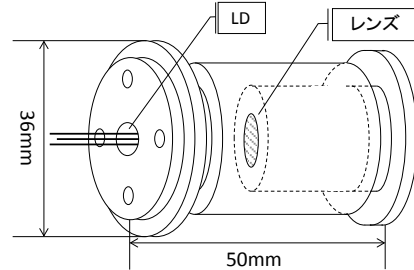


図4 光学系構造図

できる構造になっている。

LDはシリンダの中央にあり、両側から真鍮製の板で挟み込み、板の4隅にネジ穴を開けてネジで固定している。また、LDのレーザ照射方向は空洞にし、円筒型となっている。

レンズ側のシリンダにはレンズが接着しており、LD側との固定をネジ式とすることでLDとレンズ間の距離を変更することが可能で、発振させたレーザ光の集光距離を調整でき、これにより平行ビーム調整を簡略化した。

自己結合効果による音波検出は振動に弱く、反射板が音によって振動し、戻り光量が変化してしまう欠点がある。そこで反射板は上下左右にネジ式で可変可能なマグネットベースに固定した。反射板にはコーナーキューブ型を用いているため、光の回帰率は高いがコーナーキューブの山の部分にレーザが当たり、発散による戻り光量が減少してしまうことがある。ここで可変可能なものを用いることによって、細かい光軸調整を出来るようにし、振動との光軸調整を解決した。

4. 出力波形

本研究で作製した装置（以下、レーザマイクロホン）のオシロスコープで得られる信号波形を図5に示す。

測定条件をスピーカとレーザ光軸の距離を10[cm]、LDと反射板距離を15[cm]、入力電圧5[V]、入力周波数1.5[kHz]とした。回路、反射板が接着してあるマグネットベースを光学ステージに磁石で固定した。また、光学ステージは除振台ともなっている。図5より、上の波形がレーザマイクロホンで得られる電圧波形、下はスピーカの入力信号となっている。レーザマイクロホンでは約15[mV]が出力されており、多少ノイズが入り込んでいるものの、音の検出が行えていることが分かる。また、レーザマイクロホンの出力をスピーカに直接つなぐことによって、人の声をそのまま聞くことが出来る。

また、反射板が接着されているマグネットベースに振動を与えた。音による出力電圧は約15[mV]だったのに対

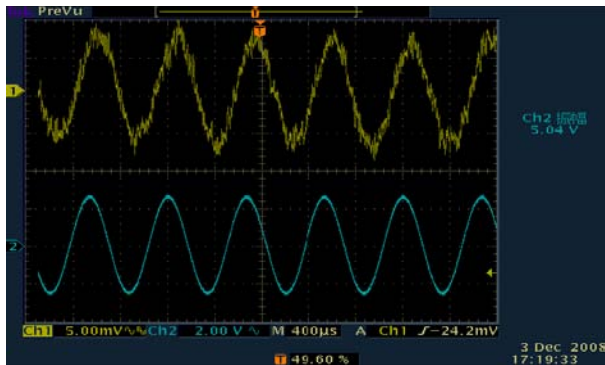


図5 出力電圧波形

し、1[V]以上の値を示す。さらに振動による様々な周波数成分の混ざってしまい、正確な音波検出が不可能になる。これより音波による自己結合効果の光出力の増減は振動に比べ小さく、振動に弱いことが分かる。振動対策として考えられることが、反射板をある程度重い対象物に固定をする、フィルタ回路を用いて振動の周波数成分をカットする、レーザシリンダと反射板を一体型として双方の間の距離が変化しないような設計を行うことによって改善することができる。

5. 周波数特性結果

5-1. 一般的な部屋における周波数特性

一般的な部屋(60[dB]以上)での周波数特性の測定を行った。測定条件としてスピーカへの入力電圧を 5[V]、レーザ光軸とスピーカの距離を 10[cm]、LD と反射板との距離 15[cm]一定とした。そして、周波数を 300[Hz]から 30[kHz]まで変化させて測定を行った。騒音計、コンデンサマイク、レーザマイクロホンの測定結果をそれぞれ図 6 に示す。騒音計はオシロスコープで出力電圧を測定し、入力電圧からの利得を示した。また、騒音計は小野計器株式会社製の普通騒音計 LA-1210 を使用し、騒音計の特性はスピーカの特性になると考えられる。レーザマイクロホンは 5 回測定の平均の値を取った。

図 6 から分かるようにレーザでも音の検出を行えることがわかる。しかし平均を取っているにもかかわらず上下の変動が見れる。これは測定を行った部屋の騒音(60[dB]以上)が原因の一つとして考えることができる。別の原因として、人の動きや装置の振動が反射板、もしくはレーザシリンダに伝わり、戻り光量が変化したためとも考えることができる。

レーザマイクロホンとコンデンサマイクを比較すると、レーザマイクロホンでは 6[kHz]付近以降から検出は行っていないものの、ある周波数でピークを示すなど同

じような動きを見せる箇所があるため、周波数特性を得られていることが分かる。低い周波数は受信回路にカップリングコンデンサを用いているために減衰してしまったが、カップリングコンデンサを大きなものにすればより低い周波数まで検出できる可能性がある。原理的には高い周波数、数百[MHz]まで検出することができるが、今回減衰してしまっている原因はわかっていない。しかし、得られる信号値は低いものの、超音波センサを用いた 40[kHz]の検出を行うことができた。

また、測定値にばらつきが見られたために平均値からのばらつき誤差を求めた。ばらつき誤差では最高で 37[%]の誤差があり、平均しても約 20[%]もある結果となった。周波数が約 3[kHz]付近ではスピーカの音圧が高かったために、周りの騒音の影響を受けにくくなりばらつきが抑えられた。ある程度の大きい音圧で測定を行えば測定値のばらつきを解消することができ、周波数特性も良くなると考えられる。

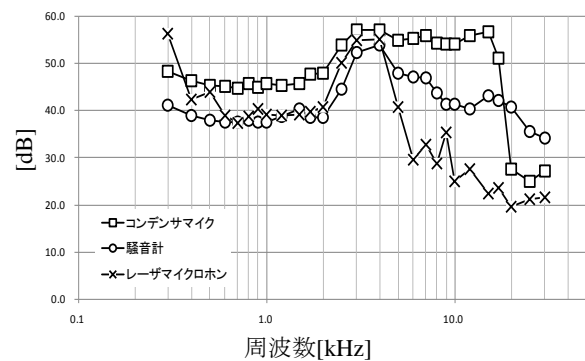


図6 周波数特性

5-2. 遮音室内における周波数特性

光学系とスピーカのみを遮音室内(約 45[dB])に入れ、周波数特性の測定を行った。測定条件をスピーカへの入力電圧を 5[V]、レーザ光軸とスピーカの距離を 10[cm]、LD と反射板との距離 15[cm]一定とした。そして、周波数を 300[Hz]から 30[kHz]まで変化させて測定を行った。結果を図 7 に示す。同様に一般的なコンデンサマイクと騒音計と比較し、レーザマイクロホンは 5 回測定の平均を取った。

一般的な部屋に比べ遮音室内での騒音が、60[dB]から 45[dB]まで下げることができ、レーザマイクロホンの特性もかなり安定するようになった。騒音計の測定可能周波数域が 8[kHz]のため、8[kHz]以降の周波数の特性の正確性はないが、コンデンサマイクと騒音計は低い周波数では同じような特性を見ることが出来る。さらに、一般

的な部屋での結果と比べると、特性が異なる。レーザーマイクロホンでの特性も安定し、これらから測定環境が大きく測定結果に影響していることが分かる。

また同じようにレーザーマイクロホンのばらつき誤差を求めた。ばらつき誤差は最高 31[%]、平均 15[%]となった。周りの騒音レベルが下がることによって再現性が改善され、この場合も音圧の高い 3[kHz]付近はばらつきが減った。

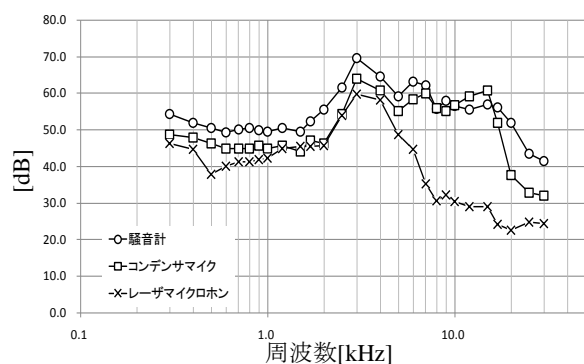


図7 周波数特性

6. 入力電圧特性

遮音室内で、周波数 1[kHz]、レーザー光軸とスピーカの距離を 10[cm]、LD と反射板との距離 15[cm]一定とし、入力電圧を変化させて入力電圧特性の測定を行った。コンデンサマイクとレーザーマイクロホンの結果を図 8 に示す。

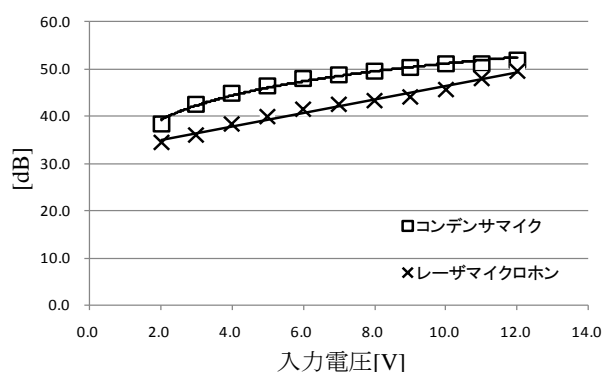


図8 入力電圧特性

コンデンサマイクでは入力電圧が高くなると飽和してしまっているのに対し、レーザーマイクロホンでは飽和することなく出力を得ることが出来た。結果は 1[kHz]のみだが、他の周波数でも同じような結果が得られた。これにより高音圧に強いことが分かる。また、結果では最大 12[V]までの測定だが、これ以上はスピーカからの音が歪

んでしまうため測定を行えなかった。しかし、原理的にはこれ以上の入力電圧による測定も行うことが可能である。

7. スピーカ距離特性

遮音室内で、周波数 1[kHz]、入力電圧 5[V]、LD と反射板との距離 15[cm]一定とし、レーザー光軸とスピーカの距離を変化させて距離特性の測定を行った。コンデンサマイクとレーザーマイクロホンの結果を図 9 に示す。

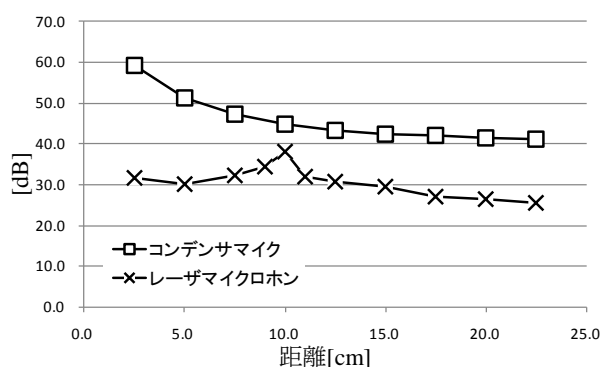


図9 スピーカ距離特性

コンデンサマイクでは距離に対し反比例で減少するが、レーザーマイクロホンではある距離でピークに持つ特性となった。音圧は距離に反比例して弱くなり、コンデンサマイクで得られる電圧が低くなった。しかし、レーザーマイクロホンの検出には音の音圧と、レーザー光路上の屈折率変化が起きている領域との積で決まる。音というのは音源から広がり、遠くなれば音圧も下がる。そのためレーザー光路全体に音が当たり、音圧もある程度強い 10[cm]の距離が最も感度がよくなると考えられる。

また、周波数が 1[kHz]にかぎらず他の周波数でも同様の結果が得られ、LD と反射板距離を変更するとスピーカの最適な距離も変化すると考えられる。

8. スピーカ角度依存特性

遮音室内で、周波数 1[kHz]、入力電圧 5[V]、LD と反射板との距離 15[cm]一定とし、レーザー光軸とスピーカの距離を 10[cm]に保ち、レーザー光軸の中心 (7.5[cm]の場所)を中心に、スピーカの角度を変化させて角度依存特性の測定を行った。結果を図 10 に示す。

角度軸は、レーザー光軸とスピーカが直角の関係にある時を 0[°]とし、シリンダ側からレーザー方向に向けた場合を正の値、反射板側からレーザーに向けた場合を負の値と

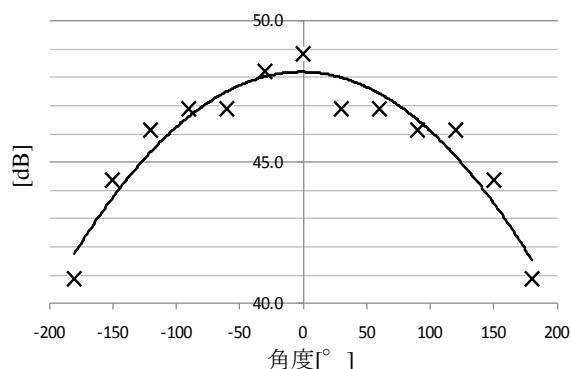


図 10 スピーカ角度依存特性

してある。

スピーカを直角に置いた場合が最も感度が良く、スピーカの角度をシリンダ側、もしくは反射板側に变化させると感度が悪くなる結果となった。音波は粗密波であり、空気密度の高低で構成され、音源から扇状に出力されて波として広がっていく。スピーカをレーザ光軸に対して直角に置くことで、レーザにはほぼ同時に全体に音波が当たる。そのため、レーザ光路上では屈折率変化（波長変化）が同時に全体で起こる。しかし、スピーカの角度を変化させ、横から当てることによってレーザ光路上で音波が当たる時間に違いが生まれる。それによりレーザ光路上の場所によっては音の密の部分、疎の部分が存在するため、レーザ光路上全体の波長変化を見ると、打ち消しあってしまうと得られる電圧値が減少したと考えられる。

この結果は、本研究で作製したレーザマイクロホンの特徴を大きくとらえており、レーザで音波検出が行われていることになる。

9. まとめ

半導体レーザには極力避けられてきた、半導体レーザからの出力光と物体に照射させた時の散乱光とが戻り光として活性領域内に戻ると出力光と干渉してしまい、ノイズを生じるという現象（自己結合効果）を積極的に利用することで、音波検出に応用した。現在、音波検出にはコンデンサ型、ダイナミック型のマイクが一般的で、これらマイクロホンにある欠点を改善でき、レーザを使用した新しいマイクロホンの作製を目的とした。

周波数特性を測定し、市販のコンデンサマイクと比較した。理論では広い周波数帯域を検出することができるのが特徴だが、高い周波数（6[kHz]以上）では検出が行えていない結果となり、受信回路の見直しが必要となる。

しかし、レーザの出力をスピーカに直接つなぐことにより、音波を聞くことが可能なため、音の検出は行えている。測定環境、例えば一般的な部屋(60[dB]以上)から遮音室内(45[dB])に改善することによって測定値は大きく安定し、測定値のばらつきも抑えることができる。また、スピーカの音の音圧をある程度上げて測定を行うことによって、周りの騒音の影響を軽減することができ、測定値のばらつきも抑えることができる。

入力電圧特性の測定を行った。従来のマイクロホンでは振動膜が破れる恐れがあるため高音圧には弱いですが、レーザマイクロホンでは音圧に左右されることなく音波検出を行うことができた。

レーザとスピーカの距離を変化させて得られる電圧を測定した。音は音源から扇状に広がり、距離と共に音圧が減少する。レーザマイクロホンでは音の音圧と、レーザ光路上の屈折率変化が起きている領域との積で決まり、少し距離を置くことで感度が最もよくなる結果につながった。

レーザ光軸とスピーカの距離を一定に保ち、スピーカの角度を変化させて測定を行った。レーザ光軸に対しスピーカを直角の位置に置いた場合が最も感度が良くなった。音は粗密波であり扇状に広がる。レーザマイクロホンの検出は、レーザの光路上の屈折率変化が起きている領域に加え、さらにその領域内で同じ変化（音の疎の部分か密の部分）をすることで感度が上がる。

距離特性と角度依存特性の2つの結果から、本研究で作製したレーザマイクロホンの特徴を大きくとらえており、レーザで音を検出できていることがわかる。しかしレーザマイクロホンはまだ不明な点が多く、スピーカの向き、反射板の種類・固定方法によっても大きく測定結果が異なる。より正確な受音特性の測定の為にもレーザ光のみに音波が当たるような条件下（指向性を持つスピーカ）、測定環境の見直しを行う必要がある。

参考文献

- 1) 光木文秋, 陶山翔大, 池上知顯, 中宮俊幸, 園田義人: 「光波マイクロホンによる沿面放電音の測定と解析」, レーザ研究, Vol.37, No.5, pp.379-383(2009.5)
- 2) 名和靖彦, 津田紀生, 山田諄: 「自己結合効果を用いた微小振動の自動測定」, 電気学会論文誌 C, Vol.129, No.12, pp.2115-2120(2009.12)
- 3) 坂本明紀, 津田紀生, 山田諄: 「面発光レーザを用いた自己結合型距離計の特性」, 電気学会論文誌 C, Vol.126-C, No.12, pp.1454-1459(2006.12)